

УДК 620.186

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ  
АДДИТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

А.О. Панфилов<sup>1,2</sup>, Е.О. Княжев<sup>1,2</sup>, А.В. Гусарова<sup>2</sup>

Научный руководитель: к.т.н. А.В. Чумаевский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический 2/4, 634055

E-mail: [tch7av@gmail.com](mailto:tch7av@gmail.com)

**REGULARITIES OF FORMATION POLYMETALLIC MATERIALS BY ADDITIVE ELECTRON  
BEAM TECHNOLOGY**

A.O. Panfilov<sup>1,2</sup>, E.O. Knyazhev<sup>1,2</sup>, A.V. Gusarova<sup>2</sup>

Scientific Supervisor: Ph.D., A.V. Chumaevskii<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

<sup>2</sup>Institute for Physics of Strength and Material Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

Russia, Tomsk, 2/4 Akademicheskii ave., 634055

E-mail: [tch7av@gmail.com](mailto:tch7av@gmail.com)

**Abstract.** *Samples of functional-gradient materials of the "copper-aluminum" system on a stainless steel substrate were obtained by the method of additive electron-beam technology with wire filament. The heterogeneity of the materials structure in different areas of the structural gradient was studied by the method of optical microscopy. Functionally-gradient materials of various compositions with the presence of a smooth and sharp gradient of the structure from copper to copper-aluminum alloy have been investigated. The results indicate the presence of heterogeneities in the composition and structural defects in materials and the need to find ways to eliminate them.*

**Введение.** Получение функционально-градиентных материалов из металлов и сплавов методами аддитивных технологий является одной из наиболее актуальных задач в настоящее время [1-5]. Такое положение обусловлено растущей потребностью различных отраслей промышленности для получения изделий из материалов с существенно различающимися параметрами теплопроводности, коррозионной стойкости, жаропрочности и др. [1-3,5]. Указанные сочетания могут применяться для создания трибологически стойких структур на поверхности различных металлов и сплавов, отвода тепла от штампов горячей штамповки и др. Одними из материалов, потенциально имеющих применение с использованием высокой тепло- и электропроводности в сочетании с упрочненным и износостойким поверхностным слоем являются медь и медные сплавы, а также композиционные материалы на их основе. Одним из актуальных сочетаний для таких сплавов является совмещение в одном изделии меди и композиционного материала системы «медь-алюминий», что позволит за счет твердорастворного и дисперсного интерметаллидного упрочнения материала формировать упрочненные слои на поверхности

меди и её сплавов непосредственно в процессе печати регулируя состав полиметаллической композиции. Целью настоящей работы является получение полиметаллических материалов системы «медь-алюминий» на подложке из нержавеющей стали методом электронно-лучевой проволоочной технологии с управляемой подачей филаментов в ванну расплава.

**Экспериментальная часть.** Образцы получали на экспериментальной установке в ИФПМ СО РАН. Изначально на поверхность подложки из нержавеющей стали наносили медные слои. Затем, начинали вводить в ванну расплава второй филамента из алюминиевого сплава АМг5 с повышением интенсивности подвода алюминиевого сплава и снижением для меди. В результате формировали на поверхности меди градиентный слой с переходом от чистой меди через зону твердых растворов - к интерметаллидному слою на поверхности. Полученные образцы исследовали методом оптической микроскопии на приборах Olympus LEXT 4100 и Altami MET1C.

**Результаты.** Структура зоны градиента от подложки - к медным слоям представлена неоднородными механическими смесями аустенитных и медных фрагментов (рис. 1). Медь частично внедряется в подложку за счет интенсивного проплавления последней электронным лучом. Сталь, в результате меньшей плотности, замешивается в медь на существенную глубину, в том числе в виде крупных фрагментов. Существенных дефектов структуры при этом практически не выделяется.

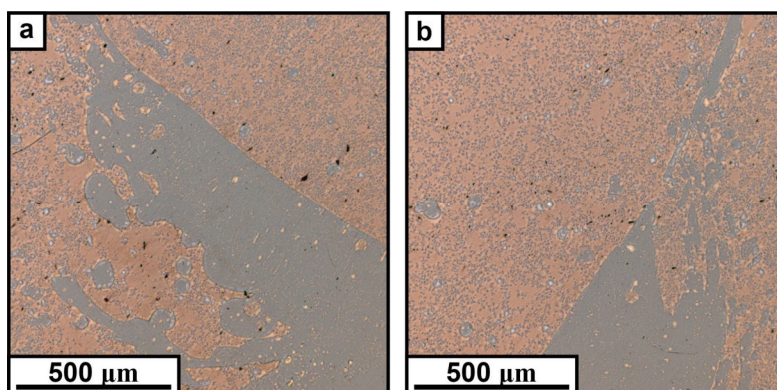


Рис. 1. Зона структурного градиента от стальной подложки - к медным слоям образца

структуре градиента медь-алюминий, напротив, образование дефектов отмечается в достаточно большом количестве (рис.2, рис. 3). Наиболее существенными из дефектов являются поры и трещины (рис. 2, а). Наиболее оптимальным является образование смешанной прослойки (рис. 2,б).

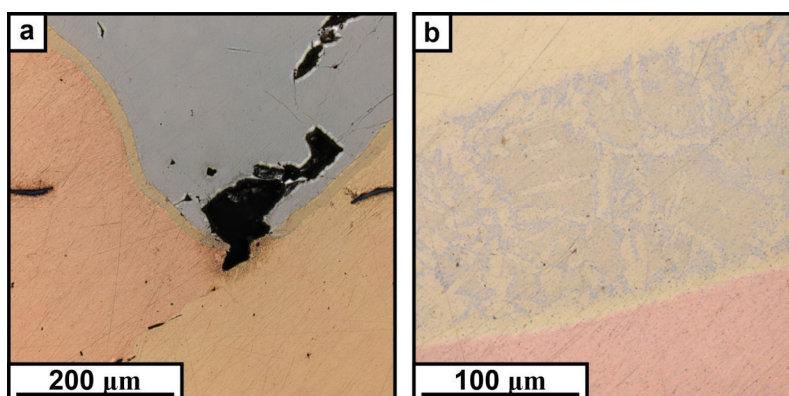


Рис. 2. Зона структурного градиента от медных слоёв - к интерметаллидным слоям

При образовании структур с содержанием интерметаллидных фаз происходит образование дендритной структуры с частицами интерметаллидов между ветвями дендритов (рис. 2, б). В таком случае дефектов в виде трещин или расслоений не наблюдается.

При приближении к зоне интерметаллидных слоёв наблюдается образование крупных фрагментов из интерметаллидов различного типа, в условиях плавного перехода от твердорастворных слоёв - к интерметаллидным не проявляющих тенденции к образованию трещин, даже при наличии существенных неоднородностей строения (рис. 3).

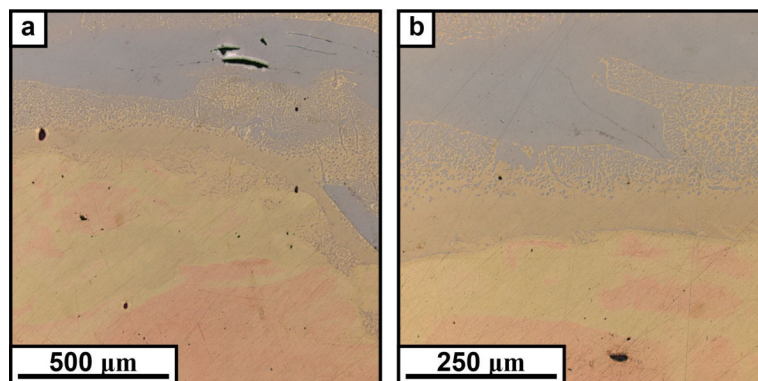


Рис. 3. Неоднородности зоны структурного градиента от медных слоёв - к интерметаллидным слоям

**Закключение.** Проведенные исследования показывают, что с использованием метода градиентной плавной подачи материала в ванну расплава при электронно-лучевой аддитивной технологии возможно получение функционально-градиентных изделий системы медь-алюминий с образованием на поверхности интерметаллидных слоёв сложного состава. Неоднородности структуры в зоне градиента с одной стороны достаточно существенны как при переходе от подложки - к меди, так и от меди - к поверхности, но, несмотря на это они не выявляют образования отслоений или растрескиваний в структуре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh, S., Singh, H. Effect of electroplated interlayers on bonding mechanism of cold-sprayed copper on SS316L steel substrate // Vacuum. – 2020. – V. 172. – P. 109092.
2. Singh, S., Singh, H., Chaudhary, S., Buddu, R.K. Effect of substrate surface roughness on properties of cold-sprayed copper coatings on SS316L steel // Surface and Coatings Technology. – 2020. – V. 389. – P. 125619.
3. Bai, Y., Zhang, J., Zhao, C., Li, C., Wang, H. Dual interfacial characterization and property in multi-material selective laser melting of 316L stainless steel and C52400 copper alloy // Materials Characterization. – 2020. – V. 167. – P. 110489.
4. Osipovich, K.S., Astafurova, E.G., Chumaevskii et al. Gradient transition zone structure in “steel–copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing // Journal of Materials Science. – 2020. – V. 55(22). – P. 9258–9272.
5. Zhang, X., Sun, C., Pan, T., Flood, A., Zhang, Y., Li, L., Liou, F. Additive manufacturing of copper – H13 tool steel bi-metallic structures via Ni-based multi-interlayer // Additive Manufacturing. – V. 36. – P. 101474.